**Ангеловський Олександр Анатолійович. Обґрунтування гідродинамічних параметрів пристрою гідроімпульсного розпушування вугільних пластів.- Дисертація канд. техн. наук: 05.05.06, НАН України, Ін-т геотехн. механіки ім. М. С. Полякова. - Дніпропетровськ, 2015.- 217 с.**

Национальная академия наук Украины

Институт геотехнической механики им. Н.с. Полякова

На правах рукописи

УДК [622.003.5:622.807.2](043.3)

АНГЕЛОВСКИЙ Александр Анатольевич

Обоснование гидродинамических параметров устройства гидроимпульсного рыхления угольных пластов

05.05.06 «Горные машины»

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Васильев Леонид Михайлович

г. Днепропетровск 2015 г

СОДЕРЖАНИЕ

|  |  |
| --- | --- |
| ВВЕДЕНИЕ …………………………………………………………...............  1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ  ГИДРОВОЗДЕЙСТВИЯ НА УГОЛЬНЫЕ ПЛАСТЫ …………..............  1.1 Анализ причин снижения эффективности мероприятий по  предотвращению выбросов угля и газа …………………………………  1.1.1 Причины разрушения угольного пласта при внезапном выбросе  угля и газа ………….................................................................................  1.1.2 Трещинообразование при нагнетании жидкости …………………....  1.2 Общие сведения о режимах, способах и средствах гидравлического  воздействия на угольные пласты ………………………………..............  1.2.1 Режимы и способы гидровоздействия на угольные пласты ...............  1.2.2 Технические средства для сообщения жидкости упругих  колебаний …………………………………………………...................  1.3 Гидродинамическая кавитация как источник динамической  нагрузки ……………………………………………………………….......  1.3.1 Режим кавитационного течения жидкости в трубке Вентури ……...  1.3.2 Анализ использования дискретно-импульсной энергии потока  жидкости для интенсификации технологических процессов …….....  1.4 Выводы, цель, задачи и методы исследований ………………………..  2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАБОЧИХ РЕЖИМОВ  гидроимпульсного рыхления УГОЛЬНЫх ПЛАСТов …….  2.1 Устройство гидроимпульсного рыхления угольных пластов …..........  2.2 Совершенствование инженерного метода расчета динамических  параметров импульсного нагружения угольных пластов ……………..  2.2.1 Теоретическое обоснование рабочих режимов гидроимпульсного  рыхления выбросоопасных угольных пластов ………………………  2.2.2 Совершенствование математической модели расчета рабочих  диапазонов частот и размахов автоколебаний, реализуемых  генератором упругих колебаний ……………………………………...  2.2.3 Определение рабочего давления жидкости на входе в генератор  упругих колебаний при различных режимах импульсного  нагнетания ……………………………………………………………...  Выводы по разделу …………………………………………………………...  3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ рабочих  режимов устройства ГИДРОИМПУЛЬСНОГО РЫХЛЕНИЯ  УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ ………………......................................................  3.1 Объект испытаний. Стенд и методика проведения испытаний ……....  3.1.1 Объект испытаний …………………………………………………......  3.1.2 Гидравлический стенд ………………………………………………  3.1.3 Методика проведения экспериментальных исследований  устройства гидроимпульсного рыхления ……………………….........  3.2 Результаты автономных испытаний генератора упругих колебаний ....  3.2.1 Экспериментальное определение расходной характеристики  генератора ……………………………………………………………....  3.2.2 Закономерности изменения динамических характеристик  генератора ……………………………………………………………....  3.3 Сопоставление теоретических и экспериментальных результатов  исследований рабочих режимов генератора устройства ………….......  3.4 Экспериментальное исследование рабочих режимов устройства  гидроимпульсного рыхления угольных пластов на имитаторе  скважины ………………………………………………………………….  3.5 Энергетическая оценка импульсного и статического режимов  нагнетания жидкости в угольный пласт ………………………………..  Выводы по разделу …………………………………………………………...  4 ГОРНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ рабочих  режимов устройства гидроимпульсного  РЫХЛЕНИЯ ВЫБРОСООПАСНЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ …….......  4.1 Основные положения методики и рекомендаций по исследованию  параметров способа и устройства гидроимпульсного воздействия ….  4.2 Результаты горно-экспериментальных работ, проведенных в  условиях шахтопласта *k*2н горизонта 617 м Орловского участка  шахтного поля СП «Шахтоуправление «Молодогвардейское» ……….  4.2.1 Исследование газодинамического состояния угольного пласта *k*2н  гор. 617 м в забоях подготовительных выработок ……................  4.2.2 Результаты исследований параметров устройства  гидроимпульсного рыхления пласта *k*2н гор. 617 м в забое 33-го  восточного Орловского конвейерного ходка (от воздухоподающего  ходка) …………………………………………………………………...  4.2.3 Результаты исследований параметров устройства  гидроимпульсного рыхления в забое 33-го восточного Орловского  конвейерного ходка (от диагонального вентиляционного ходка)  пласта *k*2н гор. 617 м ……………………………………………………  4.3 Исследование рабочих параметров устройства гидроимпульсного  рыхления в условиях пласта *i*31 СП «Шахтоуправление  «Молодогвардейское» …………………………………………………...  4.3.1 Общие сведения о месте проведения горно-экспериментальных  работ ……………………………………………………………………  4.3.2 Горно-экспериментальные работы и результаты инструментальных  измерений в забое западного вентиляционного штрека …………….  4.3.3 Горно-экспериментальные работы и результаты  инструментальных измерений в забое грузового уклона ………….  4.4 Установление рабочих режимов гидроимпульсного рыхления  угольных пластов ………………………………………………………..  4.5 Оценка технико-экономических показателей ………………………….  4.5.1 Расчет затрат на проведение мероприятий ………………………......  4.5.2 Ожидаемый экономический эффект …………………………………  Выводы по разделу …………………………………………………………...  ВЫВОДЫ ……………………………………………………………………..  Список использованных источников …………………………………….....  Приложение А. Методики и методические рекомендации для  проведения исследований ………………….......................  Приложение Б. Выписки из протоколов заседания бюро Центральной  комиссии по вопросам вентиляции, дегазации и ГДЯ в  шахтах угольной промышленности Украины …………...  Приложение В. Приказы и Технологическая проектная документация  на проведение горно-экспериментальных работ ...............  Приложение Г. Акты и Протоколы результатов проведения горно -  экспериментальных работ …………………………………  Приложение Д. Расчет экономической эффективности и Акты  использования результатов научно-исследовательских  работ в условиях шахт ПАО «Краснодонуголь» ............... | Стр.  6  13  13  13  16  18  18  21  25  25  30  37  40  40  42  42  50  60  65  67  67  67  69  71  77  77  81  87  93  105  111  115  116  121  122  126  130  132  132  134  138  144  152  152  153  156  159  163  176  180  190  197  212 |

ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Одной из сложных задач при ведении горных работ на больших глубинах является проведение выработок по незащищенным выбросоопасным угольным пластам. В этих условиях основным мероприятием по предотвращению выбросов угля и газа является гидрорыхление [1]. Однако опыт его применения показывает, что нагнетание жидкости в статическом режиме не исключает вероятность провоцирования газодинамических явлений (ГДЯ) [2]. Поэтому в опасных зонах выработки проводятся с помощью буровзрывных работ в режиме сотрясательного взрывания. В результате скорость проведения выработок снижается более чем в два раза, а затраты значительно возрастают.

Анализ известных способов и технических средств для сообщения нагнетаемой жидкости упругих колебаний [3], их использование с целью интенсификации различных процессов позволяет отметить, что они позволяют достигнуть более высокого технологического уровня, в том числе и в комплексе шахтного оборудования при гидрорыхлении угольных пластов.

С целью предотвращения внезапных выбросов угля и газа в ИГТМ НАН Украины был разработан генератор кавитационных колебаний давления жидкости (ГК), обоснованы его геометрические параметры (диаметр критического сечения; угол раскрытия диффузора, диаметр и длина последиффузорного канала), проведены лабораторные и шахтные испытания по его соответствию параметрам насосных установок [4,5]. Применение ГК [6] показало, что на его базе возможна разработка способа гидроимпульсного рыхления путем создания устройства, которое в соответствии с требованиями правил безопасности позволит контролировать параметры гидрообработки выбросоопасных угольных пластов.

Однако для создания устройства необходимо дополнительно разработать инженерный метод расчета динамических параметров импульсного нагружения угольных пластов установить амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) устройства гидроимпульсного рыхления (далее устройство) и их закономерности от напорного давления и гидросопротивления (подпорного давления) пластов, обеспечить контроль подпорного давления в процессе гидрообработки угольного массива, провести энергетическую оценку режимов нагнетания, а также установить соответствие гидродинамических параметров устройства условиям его эксплуатации.

Поэтому разработка инженерного метода расчета динамических параметров импульсного нагружения угольных пластов, исследование режимов нагнетания, установление их рациональных параметров и закономерностей изменения динамических характеристик от гидросопротивления пластов и времени гидрообработки, определение закономерности изменения потока энергии импульсного воздействия от напорного давления, обоснование на их основе параметров рабочих режимов и создание устройства гидроимпульсного рыхления угольных пластов для снижения их выбросоопасности в забоях подготовительных выработок является **актуальной научной задачей** для угольной отрасли.

**Связь работы с научными программами, планами и темами**: работа выполнена в рамках госбюджетных тем ИГТМ НАН Украины № III-36-07 «Закономерности и механизм интенсификации газовыделения и снижения пылеобразования при гидроимпульсном воздействии на газонасыщенные пласты (№ ГР 0107U002004) и № III-63-12 «Обоснование методов расчета параметров устройства гидроимпульсного воздействия на угольные пласты (№ ГР 0112U000493) в которых автор был исполнтьелем.

Выбранное направление дальнейших исследований определило **цель данной работы** – установить закономерности изменения параметров динамического нагружения угольных пластов и режимы работы устройства гидроимпульсного рыхления для повышения безопасности горных работ.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

- изучить причины снижения эффективности противовыбросных мероприятий, способы и средства гидравлического воздействия на угольные пласты, обобщить исследования явления периодически срывной кавитации, как источника преобразования статического течения жидкости в высокоэнергетический пульсирующий поток;

- усовершенствовать инженерный метод расчета динамических параметров импульс ного нагружения угольных пластов и характеристик упругих колебаний давления жидкости, которые создаются устройством гидроимпульсного рыхления, и установить закономерности их изменения;

- провести теоретическое обоснование параметров динамического нагружения выбросоопасных угольных пластов и энергетическую оценку режимов нагнетания жидкости. С учетом полученных результатов установить рабочие режимы устройства;

- провести стендовые и горно-экспериментальные исследования режимных параметров устройства гидроимпульсного рыхления и установить закономерность изменения подпорного давления от времени гидрорыхления;

**Идея работы** состоит в использовании установленных закономерностей изменения параметров амплитудного нагружения угольных пластов под действием гидроимпульсной вибрации для установления режимов работы устройства гидроимпульсного рыхления.

**Объект исследований** – рабочие процессы взаимодействия устройства гидроимпульсного рыхления с угольным пластом.

**Предмет исследований** – закономерности изменения параметров гидродинамического нагружения угольных пластов в зависимости от режимов работы устройства.

**Методы исследований** включают в себя: анализ передовых достижений науки и техники по вопросам исследования гидрорыхления угольных пластов при изучении причин снижения эффективности противовыбросных мероприятий; моделирование процесса импульсного нагнетания жидкости при совершенствовании инженерного метода расчета динамических параметров и характеристик упругих колебаний давления жидкости, которые создаются устройством гидроимпульсного рыхления; статистический анализ с применением современной электронно-вычислительной техники при обработке результатов лабораторных и горно-экспериментальных исследований.

**Основные научные положения и результаты**, которые выносятся на защиту:

- рабочий режим генератора устройства гидроимпульсного рыхления угольных пластов при различных значениях модуля упругости угля паралельно и перпендикулярно напластованию обеспечивает минимально необходимый уровень импульсного нагружения пласта 3...20 МПа, при котором максимумы размаха автоколебаний давления жидкости в частотном диапазоне 800…2500Гц в 1,5…2,5 раза превышают давление нагнетания, что инициирует развитие трещинообразования за счет снижения внутреннего и контактного трения под действием гидроимпульсной вибрации.

- поток энергии в единицу времени при гидроимпульсном воздействии, наложенный на статическую составляющую, описывается зависимостью в виде степенной функции от подпорного давления в диапазоне его изменения от 1 до 12 МПа и соответственно в 20…1,3 раза превышает поток энергии статического нагнетания, что обеспечивает повышение эффективности гидрорыхления выбросоопасных угольных пластов и увеличение зоны разгрузки призабойной части угольного пласта в 1,3…1,5 раза.

- режим работы устройства гидроимпульсного рыхление угольных пластов взаимосвязан с давлением подпора жидкости в фильтрационной части скважины и изменяется во времени, активная стадия которого заканчивается при снижении давления подпора не менее чем на 30 % от максимально установленного и описывается падающей степенной функцией, при этом, чем выше давление нагнетания, тем интенсивнее процесс гидрорыхления.

**Научная новизна работы** заключается в том, что:

- впервые теоретически обоснованы параметры импульсного нагружения угольного пласта и рабочие режимы устройства гидроимпульсного рыхления. Установлено, что при давлениях нагнетания от 10 до 20 МПа и подпора от 1 до 12 МПа, обеспечивается минимально необходимый уровень импульсной нагрузки 3…20 МПа, при которой в частотном диапазоне 800…2500 Гц максимумы размаха автоколебаний давления жидкости в 1,5…2,5 раза превышают давление нагнетания;

- дано совершенствование инженерного метода расчета гидродинамических параметров периодически срывного течения жидкости. Это позволило впервые установить зависимости размаха и частоты следования автоколебаний от давления подпора и АЧХ генератора устройства при разных давлениях нагнетания;

- впервые выполнена энергетическая оценка импульсного и статического режимов нагнетания жидкости. Определены составляющие потока энергии гидроимпульсного воздействия. Установлено, что поток энергии в единицу времени при гидроимпульсном воздействии, наложенный на статическую составляющую в зависимости от давления подпора жидкости в 1,3…20 раз превышает поток энергии статического нагнетания;

- впервые установлено, что в рабочем диапазоне режима устройства гидроимпульсного рыхления угольных пластов зависимость изменения давления подпора жидкости в фильтрационной части скважины в течение времени описывается падающей степенной функцией, при этом, чем выше давление нагнетания, тем активнее процесс гидрорыхления. Это позволяет по изменению давления подпора вести контроль процесса гидрорыхления и его эффективность.

**Обоснованность и достоверность** научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается, корректностью постановки задач, использованием фундаментальных положений гидродинамики, большим объемом экспериментальных данных с обработкой и анализом результатов исследований на ПЭВМ, коэффициентом корреляции не ниже 0,95 и корреляционным отношением от 0,87 до 0,95 при доверительной оценке регрессии установленных зависимостей не ниже 0,95, относительной погрешностью экспериментальных и теоретических данных не более 20%,результатами горно-экспериментальных работ при гидрорыхлении выбросоопасных угольных пластов с подтверждением их адекватности нормативными методами контроля в забоях подготовительных выработок.

**Научное значение работы** заключается в совершенствовании инженерного метода расчета динамических параметров импульсного нагружения угольных пластов, выявлении закономерностей изменения размаха и частоты автоколебаний от давления нагнетания и подпора, а также АЧХ генератора и устройства, энергетической оценки импульсного режима нагнетания и установлении убывающей функции изменения гидросопротивления угольного пласта во времени при его гидроимпульсном рыхлении.

**Практическое значение** полученных результатов заключается в установлении рабочих режимов устройства гидроимпульсного рыхления и критерия контроля активного процесса гидрорыхления выбросоопасных угольных пластов. При этом:

- разработаны устройство и способ гидроимпульсного рыхления, которые подтверждены патентами Украины № 68355 и № 73023;

- разработан алгоритм расчета гидродинамических параметров генератора и устройства, установлена их взаимосвязь с параметрами импульсного нагружения угольных пластов при различных значениях модуля упругости угля.

Полученные результаты использованы при разработке «Методики проведения горно-экспериментальных исследований способа гидрорыхления угольного массива в режиме импульсного нагнетания жидкости» в условиях СП «Шахтоуправление «Молодогвардейское» ПАО «Краснодонуголь».

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационной работы использованы в виде дополнения к «Технологической проектной документации» при проведении 4-х подготовительных выработок комбайнами в условиях пластов *k*2н и*i*31 СП «Шахтоуправление «Молодогвардейское» ПАО «Краснодонуголь» (Протокол от 17.09.2013 г.) и «Методических рекомендаций по гидроимпульсному рыхлению угольных пластов при проведении выработок комбайнами» (утверждено 09.10.2012 г.). Ожидаемый экономический эффект от применения гидроимпульсного рыхления выбросоопасных угольных пластов на один комбайн в год по отношению к нормативным способам составляет: при БВР – 2117,48 тыс. грн.; при гидрорыхлении в статическом режиме нагнетания – 898,88 тыс. грн. (расчет экономической эффективности от11.02.2012 г.)

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы докладывались и получили одобрение на заседаниях Центральной комиссии по вопросам вентиляции, дегазации и борьбы с газодинамическими явлениями в шахтах угольной промышленности Украины (Макеевка, 2010, 2012 гг.); Междунар. науч. школе им. С.А. Христиановича «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках» (Симферополь, 2008-2012 гг.); Междунар. науч. школе молодых учёных и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, 2008-2012 гг.); Междунар. науч. конф. «Импульсные процессы в механике сплошных сред» (Николаев, 2009 г); Междунар. научно-практической конф. «Школа подземной разработки» (Днепропетровск-Ялта 2011, 2012гг.); XX Международный научный симпозиум «Неделя горняка-2012» (Москва, 2012г.); 8-й Междунар. Конф. «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» (Тула, 2012 г).

**Личный вклад автора** состоит в разработке цели, определении идеи и задач исследований, научных положений, установлении закономерностей, усовершенствования метода и обосновании параметров рабочих режимов гидроимпульсного рыхления, формулировании выводов и рекомендаций. Проведение лабораторных исследований и горно-экспериментальных работ выполнены автором при содействии сотрудников ИГТМ НАН Украины и технического персонала СП «Шахтоуправление «Молодогвардейское» ПАО «Краснодонуголь».

Содержание диссертации изложено автором лично.

**Публикации.** Основное содержание диссертации изложено в 16 научных публикациях. 10 в специализированных изданий, из которых 3 – в зарубежных изданиях, 2 – в отечественных изданиях, которые входят в международные наукометрические базы, 1 работа самостоятельная; 4 – в тезисах докладов конференций; 2 – патента Украины.

**Структура и объем** **диссертации.** Диссертация состоит из вступления, 4 разделов и выводов, в том числе 22 таблицы, 73 рисунка, списка использованных источников из 128 наименований и 5 приложений, изложенных на 217 стр. машинописного текста.

ВЫВОДЫ

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой дано решение актуальной научной задачи обоснования гидродинамических параметров устройства гидроимпульсного рыхления угольных пластов, заключающееся в определении взаимосвязи гидродинамических параметров устройства в виде гиперболической зависимости размаха давления жидкости от частоты автоколебаний и их сопоставления с закономерностями изменения параметров импульсного нагружения угольных пластов в результате вибрационного воздействия, выявлении степенной зависимости потока импульсной энергии за единицу времени от давления подпора, его изменения в виде убывающей степенной функции от времени гидрообработки, на основании которых, на уровне изобретения, разработано устройство гидроимпульсного рыхления выбросоопасных угольных пластов и проведены горно-экспериментальные работы, что позволило установить гидродинамические параметры рабочих режимов устройства, которые обеспечивают повышение эффективности гидрорыхления и безопасности труда за счет увеличения зоны разгрузки призабойной части выбросоопасных угольных пластов, снижения времени и энергозатрат гидрообработки. Эти результаты использованы при разработке «Методики проведения горно-экспериментальных исследований способа гидрорыхления угольного массива в режиме импульсного нагнетания жидкости» в дополнениях к «Технологической проектной документации» при проведении 4 подготовительных выработок в условиях СП «Шахтоуправление «Молодогвардейское» ПАО «Краснодонуголь» при ожидаемом экономическом эффекте в сравнении со статическим нагнетанием около 900 тыс. грн. в год на один комбайн.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы:

1. Анализ состояния вопроса показал, что использование явления периодически срывной кавитации, как источника гидродинамической нагрузки, является наиболее перспективным при разработке устройства гидроимпульсного рыхления угольных пластов;

2. Дано совершенствование инженерного метода расчета гидродинамических параметров кавитационного течения жидкости за генератором, что позволило разработать алгоритм расчета амплитудно-частотных характеристик устройства гидроимпульсного рыхления, установить их взаимосвязь с параметрами динамического нагружения при различных значениях модуля упругости угля;

3. Моделированием режимов гидроимпульсного рыхления угольных пластов установлено, что:

- генератор работает в режиме кавитации со стабильным расходом жидкости при Рп/Рн ≤0,82, а при отношении Рп/Рн > 0,82 как простое гидравлическое сопротивление, одновременно с изменением давления подпора изменяется расход жидкости;

- рабочий режим кавитации характеризуется линейной зависимостью частоты автоколебаний от давления подпора с высокой степенью достоверности аппроксимации (R2 не ниже 0,99) и нелинейной зависимостью размаха автоколебаний от давления подпора, которая описываются аппроксимационным полиномиальным уравнением четвертой степени с достоверностью 0,87…0,95.

- относительная погрешность теоретических и экспериментальных зависимостей составляет 10% по частоте и 20 % по размаху автоколебаний;

- АЧХ устройства с генератором ГК-2,5 в диапазоне изменения давления подпора *Р*п=1…12 МПа соответствуют теоретически обоснованным значениям режимов импульсного гидрорыхления угольных пластов;

4. Теоретически и экспериментально обосновано, что рабочий режим генератора устройства гидроимпульсного рыхления угольных пластов при различных значениях модуля упругости угля паралельно и перпендикулярно напластованию, обеспечивает минимально необходимый уровень импульсного нагружения пласта 3...20 МПа, при котором максимумы размаха автоколебаний давления жидкости в частотном диапазоне 800…2500 Гц в 1,5…2,5 раза превышают давление нагнетания, что инициирует развитие трещинообразования за счет снижения внутреннего и контактного трения под действием гидроимпульсной вибрации.

5. Исследования потоков энергии статического и импульсного режимов нагнетания жидкости в рабочих диапазонах их параметров показали, что поток энергии в единицу времени при гидроимпульсном воздействии, наложенный на статическую составляющую, описывается зависимостью в виде степенной функции от подпорного давления в диапазоне его изменения от 1 до 12 МПа и соответственно в 20…1,3 раза превышает поток энергии статического нагнетания, что обеспечивает повышение эффективности гидрорыхления выбросоопасных угольных пластов и увеличение зоны разгрузки призабойной части угольного пласта в 1,3…1,5 раза;

6. Впервые научно обосновано, что критерием контроля гидроимпульсного рыхления угольных пластов является давление подпора жидкости в фильтрационной части скважины, при изменении которого меняются параметры кавитационного течения жидкости – частота и размах автоколебаний;

7. Горно-экспериментальными работами установлено, что режим периодически срывного течения жидкости возникает одновременно с заполнением водой фильтрационной части скважины и нарушенной прискважинной зоны. Первоначально, при установлении подпорного давления, АЧХ устройства обеспечивают эффективное проникновение жидкости в угольный пласт в плоскости напластования. При установившемся давлении подпора, которое соответствует гидросопротивлению пласта, происходит интенсивное развитие трещин по разнонаклонным плоскостям, т.е. активное гидрорыхление. Давление подпора жидкости изменяется в широком диапазоне от минимального 1,5…2,0 МПа до максимального 7,5…8,0 МПа. Окончание активной стадии гидрорыхления определяется снижением колебаний давления подпора, которое стабилизируется и составляет 3.0…4,5 МПа, при этом рабочий режим устройства автоматически переходит в диапазон с минимальными значениями размаха автоколебаний;

8. Результатами инструментальных измерений в промышленных условиях впервые установлено, что режим работы устройства гидроимпульсного рыхления угольных пластов взаимосвязан с давлением подпора жидкости в фильтрационной части скважины и изменяется во времени, активная стадия которого заканчивается при снижении давления подпора не менее чем на 30 % от максимально установленного и описывается убывающей степенной функцией, при этом, чем выше давление нагнетания, тем интенсивнее процесс гидрорыхления. Это позволяет по изменению давления подпора вести контроль активного процесса гидрорыхления и его эффективности;

9. Результаты диссертационной работы внедрены в виде 4-х «Дополнений к «Проектной тохнологической документации на проведение и крепление выработок», «Методики проведения горно-экспериментальных исследований способа гидрорыхления угольного массива в режиме импульсного нагнетания жидкости» и «Методических рекомендаций по гидроимпульсному рыхлению угольных пластов при проведении выработок комбайнами в условиях СП «Шахтоуправление «Молодогвардейское» ПАО «Краснодонуголь».

10. Ожидаемый экономический эффект от применения гидроимпульсного рыхления выбросоопасных угольных пластов на один комбайн в год на шахтах ПАО «Краснодонуголь» по отношению к нормативным способам составляет: при БВР – более 2,1 млн. грн., при гидрорыхлении в статическом режиме нагнетания жидкости около 900 тыс. грн.